doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.06.007

一种适用于窄波束雷达捕获空间目标的 等仰角搜索方法

刘科君^{1,2,3} 徐 动^{1,3†} 曹志斌^{1,3‡}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210023)

摘要 点位预报作为引导雷达寻找、捕获、跟踪目标的基础, 受定轨误差及预报误差的影响, 其精度对窄波束 雷达存在不足的风险. 由于沿迹误差是影响点位预报精度的主要因素, 基于沿迹误差补偿的思路, 提出了一种适 用于窄波束雷达的过境目标等仰角搜索方法, 在预估的沿迹误差范围内对目标一次过境时在指定仰角上可能出 现的所有位置做遍历观测, 从而提高雷达捕获空间目标的成功率. 仿真算例表明, 当点位预报失效时, 等仰角搜 索方法仍然能观测到目标.

关键词 点位预报, 窄波束雷达, 沿迹误差, 等仰角搜索 中图分类号: P135; 文献标识码: A

1 引言

通常雷达观测空间目标的过程是根据点位预 报的引导,捕获目标并跟踪获取数据,因此对于点 位预报的精度有一定的要求,特别是影响最大的沿 迹误差部分^[1-2],对视场很小(例如0.1°甚至更窄)的 高频窄波束雷达而言,点位预报就有可能失效.

为解决此问题,可以从提高预报精度和改变雷达工作模式两方面入手,目前已有一些针对性的积极工作^[3-6],如文献[5]针对主要作用在沿迹方向却难以精确计算的大气阻力,从沿迹误差发散规律的表达式中寻求特殊条件,调节预报段的大气阻力系数,让初值和模型的误差得到"抑制"或者"抵消",从而使得误差发散斜率趋近于0.这个方法能将短期预报精度提高45%左右.

文献[6]从改变雷达工作模式出发,提出采用低

频宽波束和高频窄波束相结合进行点位搜索的方式,即先由低频宽波束根据目标指向预报的程序引导,完成对目标的捕获和跟踪,然后转同轴高频窄 波束对目标继续进行捕获和跟踪;或直接使用高频 窄波束,在对目标过境点位进行搜索的同时,在较 小的预定区域以叠加螺旋扫描^[7]搜索的方式实现 目标捕获.

本文借鉴前人观测激光卫星的凝视和拦截预 报思想^[8-9],提出了一种适用于窄波束雷达捕获空 间目标的等仰角搜索方法,该方法的基本出发点 是:虽然不能确知沿迹误差,但可以先行预估沿迹 误差的范围,同一轨道上沿迹误差范围内不同位置 的目标,受地球自转的影响,到达测站当地某个过 境仰角的时间和方位角将随目标沿迹位置的前后 关系呈单调变化,因此实际目标到达这个仰角的可 能时间和方位角均存在一个有序变化范围.基于这

²⁰²¹⁻¹²⁻¹⁷收到原稿, 2022-01-30收到修改稿

[†]xujin@pmo.ac.cn

[‡]zbcao@pmo.ac.cn

个规律,可以通过搜索指定一个合适的仰角,根据 雷达的有效波束直径,在方位角范围及其相应的时 间范围内进行有序分割,以生成雷达的系列引导数 据,雷达按这些引导数据在指定仰角上对目标进行 搜索,其效果相当于对沿迹误差范围内的目标在指 定仰角上所有可能出现的位置实施遍历观测,而目 标的实际位置就在其中.

2 方法步骤

等仰角搜索可以形象地描述为: 雷达观测目标 时, 其波束指向的仰角始终保持不变, 根据计算出 的引导数据, 按照时间的推移单向调整波束指向的 方位角, 从而完成对目标的搜索捕获. 具体算法步 骤如图1所示.



图 1 等仰角搜索流程

Fig. 1 The procedure of constant elevation search method

详细步骤描述如下:

(1)根据空间目标(本文主要针对低轨高动态 目标)的一组初始精密轨道根数 $\sigma_q(t_q, \vec{r}_q, \vec{r}_q, \epsilon)$ (其 中 t_q 为该组轨道参数的历元时刻, \vec{r}_q 、 \vec{r}_q 分别为目 标相对于历元地心惯性系的位置和速度矢量, ϵ 为 目标面质比),使用数值积分^[1]方法和高精密力学模 型(力模型包括地球非球形摄动、日月引力、大气 阻力)^[1]外推计算出某次过境中间时刻 t_0 的位置速 度矢量 \vec{r}_0 和 \vec{r}_0 ,转换为第一类无奇点变量形式的初 始拟平均根数^[1, 10],建立一种简化分析摄动模型, 用于计算该次过境期间的目标根数变化.此简化分 析摄动模型在目标该次过境时间段内,仅包含轨道 摄动变化的一阶长期项、一阶短周期项以及二阶 短周期项中由地球自转引起的少量降阶项;

(2)依据预估的沿迹误差范围,可以将t₀时刻的 初始拟平均根数等时间间隔离散为一系列仅平纬 度角λ不同的虚拟目标,各虚拟目标对应于同一轨 道上的不同沿迹位置,且时差分布恰好覆盖预估的 沿迹误差范围.由于地球自转,从观测站的角度看, 各虚拟目标在一次过境期间所产生的不同视轨迹 将组成一个视轨迹簇,其中每条视轨迹的观测仰角 都是呈先升后降变化,在近站点达到仰角最大值, 并且视轨迹簇中的最大仰角具有逐步变大(接近天 顶)、逐步变小(远离天顶)、先逐步增大过天顶后 再逐步变小3种变化规律;

(3)雷达观测的前提是可见,同时需要获取数 量足且质量高的观测数据,这就决定了近站点不可 见或可探测弧段太短的视轨迹都是无效的,可据此 结合雷达的观测条件(作用距离和仰角限制)进行筛 除^[11-12].视轨迹簇的连续变化特征使得所筛除的 若干视轨迹一定集中、连续地处于视轨迹簇的两 端或其中一端,因此筛除后的视轨迹簇仍然具有连 续性,从而可以计算出剩余视轨迹最大可探测仰角 的最小值H和最小可探测仰角的最大值h,根据视 轨迹簇的连续变化特征和雷达作用距约束条件可 以证明H总是大于h,于是可确定该次过境的搜索 仰角取值范围: $h_s \in [h, H]$.由于过境的搜索仰角可 选范围在计算前是未知的,因此无法直接指定搜索 仰角, 但可以通过设置一个比例因子 β , 使搜索仰角 按下式取值: $h_s = h + \beta \times (H - h)$;

(4)根据选取的有效搜索仰角hs,可以计算各 连续虚拟目标上升到该仰角时的特征参量,包括 目标到达时刻 t_k 、方位角 A_k 、观测斜距 ρ_k 等, k按 照沿迹位置先后依次表示不同的虚拟目标.考虑 到目标运动的角速度远大于地球自转速度,则可 断定各虚拟目标上升到搜索仰角h。的时间t_k和方位 角A_k随k的单调变化(方位角需经连续化处理).因 此可认为真实目标上升到搜索仰角h。时的可能方 位角与对应时间存在严格单调函数关系,虽然真实 目标上升到搜索仰角h。时的方位不确知, 但它如果 出现在某一个方位,则只可能出现于一个唯一的 时刻. 这一时空关系结论使得在沿迹误差估值范 围包含实际沿迹误差的前提下, 雷达按时序进行 等仰角搜索时能够遍历真实目标所有可能出现的 方位.因此可以t_k为基点,利用基点上的特征参量, 采用三次自然样条内插[12]构建关于方位、斜距等 的插值函数A(t)和 $\rho(t)$ 等.同时,由于构造出的方位 角A(t)是时刻t的严格单调函数,其存在一个唯一的 逆函数,可以A_k为基点构造出插值函数t(A),用于 给出真实目标在一个连续的方位角范围内可能出 现的不同时刻;

(5)记步骤(4)中目标上升到指定仰角h。的时间 范围对应的方位角范围为 ΔA . 与之相对应的, 雷 达在指定仰角 h_s 上的搜索范围记为 $\Delta \psi$. 对 $\Delta \psi$ 按照 雷达有效波束直径进行均匀划分后,即成为若干个 搜索子区间,每个子区间的值均为 $\Delta \psi^*$; ΔA 也相应 地被划分为同样多个子区间,每个子区间的值均 为 ΔA^* ,如图2所示.将雷达波束按时间顺序依次摆 放于每个 $\Delta\psi^*$ 的中心方向,该方向的方位角即为对 $应\Delta A^*$ 的中心方位角;每个 $\Delta \psi^*$ 代表一次波束驻留, 驻留的起止时间即为对应 ΔA^* 的首末端点时间(可 通过步骤(4)中构造的插值函数得到),这样就形成 了等仰角搜索过程.实际上,由于非沿迹误差(法向 和径向)未在预估误差中考虑, 需要将按有效波束 直径划分的子区间适当重叠,才能在非沿迹误差增 长不超过有效波束半径的前提下保证搜索无遗漏, 重叠示意图如图3所示, δ表示子区间的重叠比例.



图 2 指定仰角上的搜索范围及子区间划分方法

Fig. 2 The search scope and division of subinterval on a specified elevation



3 等仰角搜索方法的效果验证

3.1 验证方法

为了验证等仰角搜索方法是否有效,本文与采用SGP4 (简化常规摄动模型)的点位预报结果进行

了对比,选择激光星为测试目标,选取该目标的一 个过境时段,并以若干天前的TLE (双行轨道根数) 为初始根数,分别产生该过境时段的等仰角搜索 数据和点位预报数据,然后使用国际激光测距服 务(ILRS)发布的激光星精密星历解算的站心系观 测量为比对数据,比对数据时刻取整秒点.

(1)等仰角搜索方法

63卷

从某一过境区间中选择一个有比对数据的仰 角值作为搜索仰角,计算波束按该仰角搜索时的引 导数据,包括若干驻留波束的起止时刻、中心指向 的方位角以及驻留波束中心指向上的激光星距离. 按照比对数据的历元时刻查找对应时间区间的驻 留波束,比较该驻留波束中心指向与比对数据站心 观测矢量的夹角,即指向偏差.若指向偏差小于波 束有效半宽,则代表等仰角搜索有效,否则代表其 失效.

(2)点位预报方法

采用SGP4模型预报该激光星在同一个比对数 据时刻的位置和速度,进而计算其相对于测站的方 位角和仰角.比较预报点位的站心观测矢量与比对 数据的站心观测矢量的夹角,即点位预报的指向偏 差,比较依据同上.

3.2 算例分析

3.2.1 有效性验证

本节按照不同轨道高度选择3颗激光星作为测试目标(北美防空司令部(NORAD)编目号分别为 39452、36508和16908), 雷达波束半宽设为0.025°, 涉及到的时刻均为北京时间.

(1)轨道高度420 km的39452

用2021年3月12日4:21:50.766的TLE根数,产 生2021年3月16日3:45-3:54过境区间的引导数据,预报时长约为4 d. 所选的比对点历元时刻为2021 年3月16日3:48:01.000,方位角350.0074°、仰角 20.7434°、斜距1026455.67 m. 搜索仰角 h_s 设为 20.7434°,最大沿迹误差范围预估为±20 s,子区 间的重叠比例设为20%.表1是两种方法预报约4 d的部分引导数据,其中等仰角搜索(Constant Elevation Search, CES)部分列出了雷达波束沿 指定仰角 h_s 搜索的3个连续驻留波束,Begin time 和End time分别代表波束驻留的开始时间和结 束时间, A_1 表示驻留波束中心指向的方位角, ρ_1 表示驻留波束中心指向上的目标距离.比对 点历元时刻3:48:01.000在时间区间3:48:00.425– 3:48:02.109内,则此驻留波束(底色加粗标出)就 是我们需要查找的波束,其中心指向偏差 θ_1 为0.0084°,小于波束半宽0.025°,表明本方法有 效;点位预报部分则列出了2021年3月16日 3:48:01.000的点位(底色加粗标出), A_2 、 h_2 和 ρ_2 分 别表示预报的方位角、仰角和斜距,其指向偏 差 θ_2 为0.0943°,明显超过波束半宽,表明点位预 报失效.

(2)轨道高度750 km的36508

用2021年2月14日05:18:53.121的TLE根数,产 生2021年3月1日13:08–13:19过境区间的引导数据,预报时长约为15 d. 所选的比对点历元时刻为 2021年3月1日13:11:56.000,方位角57.0719°、仰 角19.0593°、斜距1665191.62 m. 搜索仰角 h_s 设为 19.0593°,最大沿迹误差范围预估为±30 s,子区间 的重叠比例亦设为20%.表2是两种方法预报约15 d的部分引导数据,表中各参数意义同表1.比对 点历元时刻13:11:56.000在时间区间13:11:55.789– 13:11:57.075内,则此驻留波束(底色加粗标出)就 是我们需要查找的波束,其中心指向偏差 θ_1 为 0.0066°,小于波束半宽0.025°,表明本方法有效; 而点位预报的指向偏差 θ_2 为0.1560° (底色加粗标 出),明显超过波束半宽,表明点位预报失效.

(3)轨道高度1400 km的16908

利用2020年10月16日05:25:16.146的TLE根数, 产生2021年3月1日13:29–13:49过境区间的引导 数据,预报时长约为4个半月.所选的比对点 历元时刻为2021年3月1日13:34:17.000,方位角 190.1323°、仰角25.0861°、斜距2624898.24 m. 搜 索仰角 h_s 设为25.0861°,最大沿迹误差范围预估 为±100 s,子区间的重叠比例亦设为20%.表3是两 种方法预报约4个半月的引导数据,表中各参数 意义同表1、表2.比对点历元时刻13:34:17.000在 时间区间13:34:15.945–13:34:19.519内,则此驻留 波束(底色加粗标出)就是我们需要查找的波束, 可以看出其中心指向偏差 θ_1 为0.0122°,小于波束 半宽,表示本方法有效;而点位预报的指向偏 差 θ_2 为1.8880° (底色加粗标出),远远超出了波束 半宽,表明点位预报失效.

Ta	ble 1 Compar	ison of sele	cted guidanc	e data fo	r 39452 (pi	redict abo	ut 4 days)	
		CES				SC	GP4	
Begin time	End time	$A_1/^{\circ}$	$ ho_1/{ m m}$	$ heta_1/^\circ$	$A_2/^{\circ}$	$h_2/^\circ$	$ ho_2/{ m m}$	$ heta_2/^\circ$
2021-03-16	2021-03-16	350 0583	1026858 86	_	_	_	_	_
03:47:58.741	$03:\!48:\!00.425$	390.0905	1020000.00		_			
2021-03-16	2021-03-16	350 0163	1026858 20	0.0084	350 0/10	20 6546	1030735 54	0.0043
03:48:00.425	03:48:02.109	330.0103	1020050.25	0.0004	550.0410	20.0040	1000100.04	0.0345
2021-03-16	2021-03-16	3/0 07/3	1026857 94	_	_			_
03:48:02.109	$03:\!48:\!03.792$	049.9740	1020007.94	-	-	-	-	-

表 1 39452的部分引导数据对比(预报约4 d)

表 2 36508的部分引导数据对比(预报约15 d)

Tabl	le 2 Comparis	on of sele	cted guidance	e data fo	r 36508 (p	redict ab	out 15 days)	
	(CES				S	GP4	
Begin time	End time	$A_1/^{\circ}$	$ ho_1/{ m m}$	$ heta_1/^\circ$	$A_2/^{\circ}$	$h_2/^\circ$	$ ho_2/{ m m}$	$ heta_2/^\circ$
2021-03-01	2021-03-01	57 1207	1665312 28					
13:11:54.518	13:11:55.789	57.1207	1005512.20	-	-	-	-	
2021-03-01	2021-03-01	57 0788 1665312 88 0		0.0066	56 9070	19 0674	1667882 29	0 1560
13:11:55.789	13:11:57.075	01.0100	1000012.00	0.0000	50.5010	15.0014	1001002.25	0.1000
2021-03-01	2021-03-01	57 0368	1665315 56	_	_	_	_	_
13:11:57.075	13:11:58.351	01.0000	1000010.00	-	_	-	_	_

表 3 16908的部分引导数据对比(预报约4个半月) of selected guidance data for 16908 (predict about 4.5 months)

Table	a 3 Compariso	n of selecte	ed guidance d	lata for 1	16908 (prec	lict about	4.5 months)	
		CES				SC	GP4	
Begin time	End time	$A_1/^{\circ}$	$ ho_1/{ m m}$	$ heta_1/^\circ$	$A_2/^{\circ}$	$h_2/^\circ$	$ ho_2/{ m m}$	$\theta_2/^\circ$
2021-03-01	2021-03-01	100 0750	2625161-00					
13:34:12.373	13:34:15.945	130.0750	2020101.90	-	-	-	-	-
2021-03-01	2021-03-01	190 1188	2625164 36	0.0122	101 5733	23 7285	2693927 54	1 8880
13:34:15.945	13:34:19.519	190.1100	2020104.00	0.0122	191.0700	20.1200	2033321.04	1.0000
2021-03-01	2021-03-01	190 1627	2625164-73		_			_
13:34:19.519	13:34:23.089	150.1027	2020104.10	-		-	-	-

从以上3个计算实例可以看出,在点位预报失效的情况下,等仰角搜索方法均有效,对所选轨道高度的目标均适用;且目标越高,采用等仰角搜索方法的根数有效预报时间越长.同时需要说明的是,雷达跟踪探测时对斜距引导数据的精度也有一定要求,一般是公里量级.表1-3中底色标出的引导数据中,点位预报的斜距误差分别为4279.87 m、2690.67 m、69029.30 m;而对应的等仰角搜索方法斜距误差分别为402.62 m、121.26 m、266.12 m,均显著优于点位预报.

3.2.2 效果对比

对于39452、36508和16908,分别选取2021年3月 16日3:47:52.000-3:48:10.000、2021年3月1日13:11: 47.000-13:12:05.000和2021年3月1日13:34:08.000-13:34:26.000这3个各19 s的时间段,以对比的方式 直观展示两种方法的效果,结果分别如图4、图5和 图6所示;纵坐标代表指向偏差,其中红线表示等仰 角搜索驻留波束的中心指向与同时刻比对数据的 站心观测矢量的偏差,紫线表示点位预报的站心观 测矢量与同时刻比对数据的站心观测矢量的偏差, 平行于横坐标的绿线表示波束半宽0.025°. 由图4 (a)、图5 (a)和图6 (a)可以看出,3个目标的点位预 报的指向偏差均超出波束半宽,代表这19 s的点位 预报结果均失效;图4 (b)、图5 (b)和图6 (b)分别 是图4 (a)、图5 (a)和图6 (a)中等仰角搜索算法效 果的局部放大,图中CES方法预报的观测指向偏差 在搜索过程中存在一段优于0.025°的短时区间,代 表目标可在此时被驻留波束观测到.

3.2.3 结果统计

本节通过更多算例来验证等仰角搜索方法的 有效性.继续选取3个目标其他若干个过境区间以 同样的方法进行对比,结果如表4所示,其中A₀、h₀ 和ρ₀分别表示比对数据的方位角、仰角和斜距. 最大沿迹误差范围仍分别设为±20 s、±30 s和 ±100 s,预报的时间仍分别为4 d、15 d和4个半月, 等仰角搜索所用的仰角值即各比对点站心系观测 量的仰角值(底色加粗标出),试算过程中根据需要 将子区间重叠比例调整为20%-30%不等,波束半宽 仍然为0.025°.从表4的共计25次算例结果中可以看 出,基于相同的TLE根数,点位预报全部失败,而等 仰角搜索方法均能成功.



图 4 指向偏差对比—39452. (a) 19 s过境弧段, (b)等仰角搜索效果局部放大.

Fig. 4 Comparison of pointing deviation—39452. (a) 19 s of transit arc, (b) Zoom in to show CES results.



Fig. 5 Comparison of pointing deviation—36508. (a) 19 s of transit arc, (b) Zoom in to show CES results.



图 6 指向偏差对比一16908. (a) 19 s过境弧段, (b)等仰角搜索效果局部放大.

Fig. 6 Comparison of pointing deviation-16908. (a) 19 s of transit arc, (b) Zoom in to show CES results.

					表4 更	[多引导数据]	对比结果							
				Table 4	More comp	arison of s	elected g	guidance e	data					
NOBAD ID	Hnoch	Pr(scise epher	neris			CES					SGF	4	
	Trooder	$oldsymbol{A}_0/^\circ$	$oldsymbol{h}_0/^\circ$	${oldsymbol{ ho}_0}/{ m m}$	Begin time	End time	$oldsymbol{A}_1/^{\circ}$	${oldsymbol{ ho}_1}-{oldsymbol{ ho}_0} /\mathrm{m}$	$ heta_1/^\circ$,	5(%)	$oldsymbol{A}_2/^\circ$	$h_2/^\circ ho$	$ \rho_2- ho_0 /{ m m}$	$oldsymbol{ heta}_2/^\circ$
	2021-03-13	326.4479	90 6979	002619 49	2021-03-13	2021-03-13	396 4643	398.90	0.0154	95	396 3350 9	0.8103	9998 D9	0 1549
	04:18:51.000	C 111-070		71.710 1701	04:18:50.616	04:18:51.956	0101-070	07.070	1010.0	2	1 0000.040	0010.0	10.00	7501.0
	2021-03-13	190 7619	91 3507	1003408 14	2021 - 03 - 13	2021 - 03 - 13	100 7553	100.06	0.0055	90	100 7833 9	1 4062	3008-01	0 0509
	16:11:10.000	7101.061	1000.17	LT.OOLCOOT	16:11:09.869	16:11:11.314	6001-001	00.001	0.0000	0	7 0001.001	7001-1	TO'OOOO	70000
	2021-03-14	28.0560	25 5016	88050 68	2021 - 03 - 14	2021 - 03 - 14	28 0622	389 68	0.0048	90	98 1319 9	5 6817	075,83	0 1199
	03:37:48.000	enen.07	0100.07	00.000000	03:37:47.255	03:37:48.465	7700.07	00.700	01-00-0	04	7 7101.07	1100.0	00.016	7711.0
30150	2021-03-14	191 2661	90 477E	1029903 29	2021 - 03 - 14	2021 - 03 - 14	191 8600	9KK 7K	0.0026	06	191 2926 9	0 1521	708 60	14410
	15:30:46.000	1000.171	011-07	70.0077001	15:30:45.823	15:30:46.637	6600.171	01.000	0.0000	01	7 0070.171	1001.0	00.001	1550.0
	2021-03-16	165 4700	01.461.9	000813 79	2021 - 03 - 16	2021 - 03 - 16	165 4718	65 11	0.0008	90	165 5787 9	1 9647	1808 55	0 2205
	15:40:42.000	CO LE CONT	7101.17	71.010000	15:40:41.472	15:40:42.879	01 12.001	FF.00	0.000	0	7 1010.001	1107.1	F0000F	0.77.0
	2021-03-17	10 6585	90 1893	1044598 71	2021-03-17	2021-03-17	40.6381	151 58	0.0101	06	10 3075 9	0 1178	3635 78	0 3177
	03:07:29.000	0000.7±		TIOCOLLOT	03:07:28.512	03:07:29.459	TOPOOL	OD TOL	10100	2	7 0170.0F	0.11.0	01.0000	1100
	2021-03-18	311 7511	2015402	06 103061	2021 - 03 - 18	2021 - 03 - 18	311 7646	341.86	0.0196	30	311 9011 9	0 5905	9368 00	0 1433
	03:59:27.000	1101110	1010107	1001101101	03:59:26.998	03:59:27.969	011110	00'TEP	0710.0	200	* TTO2'TTO	0.040.0	00.0002	007.1.0

63 卷

6 期

66-8

			$ /m \theta_2/^\circ $	0.0500	1 0.0299	3 0.0843	8 0.1272	8 0.1126	0 0.0508	8 0.1466	4 0.1316	9 0.0556
		P4	$ \boldsymbol{\rho}_2 - \boldsymbol{\rho}_0 $	418.60	3511.3	619.3:	3276.0	2296.5	4925.6	1562.5	3299.8	5175.3
		SC	$oldsymbol{A}_2/^\circ oldsymbol{h}_2/^\circ$	164.7452 19.9440	9.0272 20.1094	233.8508 20.9611	312.0776 19.9468	169.3392 20.0113	5.3021 20.0115	238.9267 19.8459	173.9273 19.9575	1.6165 19.9457
			$\boldsymbol{\delta}(\%)$	20	20	20	20	20	20	20	20	25
			$\mathbf{h}_{1}/^{\circ}$	0.0025	0.0189	0.0163	0.0151	0.0192	0.0158	0.0066	0.0205	0.0062
			$ \boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{ ho}_0 /\mathrm{n}$	108.77	488.15	147.36	136.67	182.86	506.44	56.55	75.22	440.50
	inued	CES	$oldsymbol{A}_1/^{\circ}$	164.7296	9.0356	233.9228	311.9587	169.3261	5.3098	239.0463	173.8807	1.6180
表 4 续	le 4 Conti		End time	2021-02-26 01:52:41.090	2021-02-26 14:02:51.509	2021-02-27 02:42:35.415	2021-02-27 14:52:42.304	2021-02-28 01:50:42.929	2021-02-28 14:00:53.921	2021-03-01 02:40:50.926	2021-03-02 01:48:45.430	2021-03-02 1 $3:58:57.226$
	Tab		Begin time	2021-02-26 01:52:38.914	2021-02-26 14:02:48.838	2021-02-27 02:42:34.060	2021-02-27 14:52:40.863	2021-02-28 01:50:40.740	2021-02-28 14:00:51.240	2021-03-01 02:40:49.675	2021-03-02 01:48:43.230	2021-03-02 13:58:54.647
		neris	${oldsymbol{ ho}_0}/{ m m}$	1615163.53	1615592.52	1570246.90	1623483.70	1608693.13	1619447.30	1617351.33	1609437.39	1622884.80
		Precise ephe	$m{h}_0/_{\circ}$	19.9910	20.1226	21.0283	19.9552	20.1195	20.0568	19.9314	20.0870	20.0008
			$oldsymbol{A}_0/^{\circ}$	164.7270	9.0557	233.9054	311.9426	169.3057	5.3266	239.0533	173.9026	1.6247
		Frach	mode	2021-02-26 01:52:39.000	2021-02-26 14:02:50.000	2021-02-27 02:42:35.000	2021-02-27 14:52:41.000	2021-02-28 01:50:42.000	2021-02-28 14:00:53.000	2021-03-01 02:40:50.000	2021-03-02 01:48:45.000	2021-03-02 13:58:57.000
		NOBAD ID						36508				

63 卷

66-9

				Tabi	le 4 Conti	inued							
NOB A D ID	Encoh	Precise epher	neris			CES					SG	P4	
	Epocii	$oldsymbol{A}_0/^\circ oldsymbol{h}_0/^\circ$	${oldsymbol{ ho}_0}/{ m m}$	Begin time	End time	$oldsymbol{A}_1/^\circ$	$\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_0 /\mathrm{m}$	$oldsymbol{ heta}_1/^\circ$ b	5 (%)	$oldsymbol{A}_2/^{\circ}$	$h_2/^\circ$	$oldsymbol{ ho}_2 - oldsymbol{ ho}_0 /\mathrm{m} $	$oldsymbol{ heta}_2/^\circ$
	2021-02-25 00:19:39.000	320.4850 25.0296	2652378.58	2021-02-25 00:19:36.878	2021-02-25 00:19:43.869	320.5003	2244.84	0.0138	20	320.0892 2	3.4932	76987.50	1.5782
	2021-02-25 15:08:32.000	210.5657 25.0498	2630020.52	2021-02-25 15:08:30.586	2021-02-25 15:08:34.668	210.5518	229.14	0.0127	20	211.2194 2:	3.5620	75966.57	1.6026
	2021-02-26 01:28:41.000	280.0423 25.0595	2645562.69	2021-02-26 01:28:40.304	2021-02-26 01:28:44.105	280.0481	345.39	0.0052	20	281.6515 2:	3.8689	60662.78	1.8875
	2021-02-26 14:15:21.000	184.8622 25.0057	2630462.78	2021-02-26 14:15:20.849	2021-02-26 14:15:24.219	184.8587	252.86	0.0031	20	186.4205 23	3.7703	62843.14	1.8816
16908	2021-02-27 00:33:18.000	301.7614 25.0572	2648115.88	2021-02-27 00:33:16.608	2021-02-27 00:33:22.224	301.7662	317.82	0.0043	20	302.4035 23	3.5496	77299.86	1.6172
	2021-02-27 15:21:59.000	238.7088 25.0824	2630197.88	2021-02-27 15:21:56.570	2021-02-27 15:22:00.601	238.6832	219.43	0.0231	25	238.3171 23	3.5257	79562.10	1.5971
	2021-02-28 14:27:40.000	215.1875 25.0623	2628052.98	2021-02-28 14:27:39.422	2021-02-28 14:27:43.089	215.1799	250.71	0.0068	30	215.6893 23	3.4971	80013.20	1.6307
	2021-02-28 22:44:55.000	331.7212 25.0640	2649700.63	2021-02-28 22:44:54.330	2021-02-28 22:45:01.032	331.7213	252.70	0.0001	25	330.6510 2	3.6117	74398.76	1.7492
	2021-03-01 23:52:38.000	298.2114 25.0674	2647882.26	2021-03-01 23:52:35.073	2021-03-01 23:52 40.429	298.2300	287.49	0.0168	20	299.0658 2:	3.5394	78344.80	1.7149

63 卷

表4 续

天 文 学 报

6 期

66-10

3.3 波束宽度探索

上文已验证等仰角搜索算法的有效性,其在 点位预报失效时仍能搜索捕获到目标.在此基础 上,本节逐渐缩小有效波束半宽,探索等仰角搜索4 d左右(最大沿迹误差均设置为±20 s)能够成功的波 束半宽下限.探索过程中根据需要适当调整重叠 比例因子δ,且若计算出的波束驻留时间接近1 s, 则不再继续探索.表5汇总了3个目标共计28组试算 成功的最窄有效波束宽度的等仰角搜索结果, bhw 表示波束半宽,搜索仰角以及比对点站心系观测量 同3.2节,且仅列出成功搜索到比对点的驻留波束 引导数据.根据表5中3目标不同过境弧段的波束半 宽下限试算结果可估计,基于TLE根数时,在波束 驻留时间接近1 s的情况下,对39452目标,有效波束 半宽下限约0.0222°(均值);对36508目标,有效波 束半宽下限约0.0151°(均值);对16908目标,有效 波束半宽下限约0.0062°(均值),可以看出轨道高 度越高,可试算成功的波束半宽下限越小.

NORAD ID	Epoch	$\delta(\%)$	$\mathrm{bhw}/^{\circ}$	Begin time	End time	Residence time/s	$ heta_1/^\circ$	$ ho_1- ho_0 /{ m m}$
	2021-03-13 04:18:51.000	25	0.022	2021-03-13 04:18:50.914	2021-03-13 04:18:52.068	1.154	0.0096	328.11
	2021-03-13 16:11:10.000	20	0.02	2021-03-13 16:11:09.580	2021-03-13 16:11:10.736	1.156	0.0173	101.01
	2021-03-14 03:37:48.000	20	0.021	2021-03-14 03:37:47.891	2021-03-14 03:37:48.913	1.022	0.0128	382.48
	2021-03-14 15:30:46.000	20	0.0313	2021-03-14 15:30:45.218	2021-03-14 15:30:46.229	1.011	0.0209	357.46
39452	2021-03-16 03:48:01.000	20	0.015	2021-03-16 03:48:00.762	2021-03-16 03:48:01.773	1.011	0.0084	402.62
	2021-03-16 15:40:42.000	20	0.018	2021-03-16 15:40:41.184	2021-03-16 15:40:42.194	1.010	0.0130	65.50
	2021-03-17 03:07:29.000	20	0.025	2021-03-17 03:07:28.512	2021-03-17 03:07:29.459	0.947	0.0191	451.58
	2021-03-18 03:59:27.000	30	0.025	2021-03-18 03:59:26.998	2021-03-18 03:59:27.969	0.971	0.0126	341.86
	2021-02-26 01:52:39.000	20	0.0125	2021-02-26 01:52:38.278	2021-02-26 01:52:39.372	1.094	0.0084	119.38
	2021-02-26 14:02:50.000	20	0.0115	2021-02-26 14:02:49.268	2021-02-26 14:02:50.506	1.238	0.0050	341.07
36508	2021-02-27 02:42:35.000	20	0.02	2021-02-27 02:42:34.346	2021-02-27 02:42:35.415	1.069	0.0134	36.96
	2021-02-27 14:52:41.000	25	0.0225	2021-02-27 14:52:39.830	2021-02-27 14:52:41.032	1.202	0.0151	396.69
	2021-02-28 01:50:42.000	20	0.0115	2021-02-28 01:50:41.647	2021-02-28 01:50:42.660	1.013	0.0015	119.93

表 5 波束半宽试算结果汇总 Table 5 The calculation results of bhw

~ / / / 4

NORAD ID	Epoch	$\delta(\%)$	bhw/°	Begin time	End time	Residence time/s	$ heta_1/^\circ$	$ ho_1 - ho_0 /{ m m}$
	2021-02-28 14:00:53.000	20	0.0095	2021-02-28 14:00:52.279	2021-02-28 14:00:53.326	1.047	0.0059	403.52
	2021-03-01 02:40:50.000	20	0.0225	2021-03-01 02:40:48.907	2021-03-01 02:40:50.022	1.115	0.0121	139.95
36508	2021-03-01 13:11:56.000	20	0.02	2021-03-01 13:11:55.781	2021-03-01 13:11:56.812	1.031	0.0136	117.65
	2021-03-02 01:48:45.000	20	0.0115	2021-03-02 01:48:44.061	2021-03-02 01:48:45.080	1.019	0.0025	30.93
	2021-03-02 13:58:57.000	20	0.0095	2021-03-02 13:58:56.232	2021-03-02 13:58:57.283	1.051	0.0093	343.25
	2021-02-25 00:19:39.000	20	0.0045	2021-02-25 00:19:38.533	2021-02-25 00:19:39.768	1.235	0.0034	2009.90
	2021-02-25 15:08:32.000	20	0.0063	2021-02-25 15:08:31.179	2021-02-25 15:08:32.194	1.015	0.0055	80.86
	2021-02-26 01:28:41.000	20	0.007	2021-02-26 01:28:40.475	2021-02-26 01:28:41.526	1.051	0.0063	101.11
	2021-02-26 14:15:21.000	20	0.008	2021-02-26 14:15:20.200	2021-02-26 14:15:21.292	1.092	0.0008	64.36
	2021-02-27 00:33:18.000	20	0.006	2021-02-27 00:33:16.743	2021-02-27 00:33:18.122	1.379	0.0011	113.87
16908	2021-02-27 15:21:59.000	20	0.006	2021-02-27 15:21:58.557	2021-02-27 15:21:59.575	1.018	0.0032	44.09
	2021-02-28 14:27:40.000	20	0.006	2021-02-28 14:27:39.585	2021-02-28 14:27:40.581	0.996	0.0025	20.56
	2021-02-28 22:44:55.000	25	0.004	2021-02-28 22:44:54.029	2021-02-28 22:44:55.096	1.067	0.0006	76.04
	2021-03-01 13:34:17.000	20	0.009	2021-03-01 13:34:16.974	2021-03-01 13:34:18.247	1.273	0.0002	365.46
	2021-03-01 23:52:38.000	25	0.0055	2021-03-01 23:52:36.939	2021-03-01 23:52:38.039	1.100	0.0029	107.34

表 5 续 Table 5 Continued

4 结论

本文基于沿迹误差补偿的思想,提出了一种适 用于窄波束雷达捕获空间目标的等仰角搜索方法, 仿真结果表明,该方法在点位预报失败的情况下能 成功捕获目标,且轨道高度越高的目标,可成功探 测的最窄波束宽度越小.本文研究工作具有以下特 点:

(1)区别于点位预报方法,通过预估沿迹误差 范围将不确知的沿迹误差转化成了可精确计算的 搜索范围,并通过精密轨道计算得到引导数据,引 导雷达波束在指定的仰角上单向调整波束指向的 方位角,为窄波束雷达或其他窄视场设备的目标捕 获提供了一条新的技术途径;

(2)通过适当重叠子区间削弱了相对于沿迹误 差均为小量且随预报时间增长缓慢的法向误差和 径向误差的影响,充分保障可靠性的同时还允许预 报更长的时间.

由于目标在被搜索到以后很快便会偏离雷达 视场,为了获得更加充足的观测资料,还需要继续 探索本文方法应用于窄视场观测设备时的工作模式,特别是如何由捕获转入跟踪的技术方法,使得观测设备能够"捕获"并"跟踪"目标,这是我们后续的工作之一.

参考文献

- [1] 刘林. 航天器轨道理论. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [2] 刘林. 人造地球卫星轨道力学. 北京: 高等教育出版社, 1992
- [3] 刘舒莳, 龚建村, 刘四清, 等. 宇航学报, 2013, 34: 157
- [4] 苍中亚, 薛炳森, 程国生, 等. 空间科学学报, 2016, 36: 188
- [5] 汪宏波,赵长印,柳仲贵,等. 天文学报, 2016, 57: 447
- [6] 王小妹, 王万玉, 毛伟, 等. 物联网技术, 2018, 8: 28
- [7] 袁刚, 王万玉, 陆和建. 现代雷达, 2008, 30: 12
- [8] 林钦畅, 牛秀兰. 中国科学院上海天文台年刊, 1979, 1:92
- [9] 谭德同, 许华冠, 牛秀兰. 天文参考资料, 1978, 3: 14
- [10] Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. Berlin: Springer, 2000: 24-29
- [11] 吴连大.人造卫星与空间碎片的轨道和探测.北京:中国科学技术 出版社, 2011: 218-219
- [12] 孙志忠, 袁慰平, 闻震初. 数值分析. 3版. 南京: 东南大学出版社, 2011

A Constant Elevation Search Method for Narrow Beam Radar to Capture Space Targets

LIU Ke-jun^{1,2,3} XU Jin^{1,3} CAO Zhi-bin^{1,3}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023) (2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026) (3 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

ABSTRACT Position prediction is the basis of guiding radar to seek, capture and track space targets, although there's a risk of insufficient accuracy for narrow beam radar due to the influence of orbit determination and propagation error. Since the along-track error is the main factor that affects the accuracy of position prediction, this paper proposed a Constant Elevation Search (CES) method for narrow beam radar, based on the idea of along-track error compensation, to seek and capture transit targets. With along-track error estimation, all possible positions on a specified elevation can be observed, thus the success rate of capturing transit targets will be improved. Simulation shows that when the position prediction method fails, the CES method still works.

Key words position prediction, narrow beam radar, along-track error, constant elevation search